

POGLAVJE 2 – Pobočne sile (sile na klancu) in plazovi

Uvod

Pobočne sile so pomemben dejavnik pri razumevanju stabilnosti terenov, saj neposredno vplivajo na premike zemlje, snega in drugih materialov po pobočju. V tem poglavju bomo obravnavali osnovne fizikalne zakonitosti sil na klancu ter njihovo povezavo z naravnimi procesi, kot so zemeljski in snežni plazovi, drobirski tokovi ter piroklastični tokovi.

Obravnavali bomo sledeče:

- Pomen pobočnih sil
- Osnovni fizikalni koncept sil na klancu
- Naravni procesi, ki jih določajo pobočne sile
- Vpliv naravnih in človeških dejavnikov na stabilnost pobočij



Sile na klancu – osnovna fizikalna teorija

Pri obravnavi stabilnosti teles na nagnjenih površinah moramo razumeti, kako delujejo sile na klancu. Ključno vlogo igra sila teže, ki se razdeli na dve komponenti – ena vpliva na premik telesa po pobočju, druga pa prispeva k trenju in stabilnosti. Razumevanje teh sil nam omogoča analizirati, zakaj pride do zdrsov in plazov, ter kako lahko vplivamo na stabilnost pobočij.

2.1 Razčlenitev sile teže na klancu

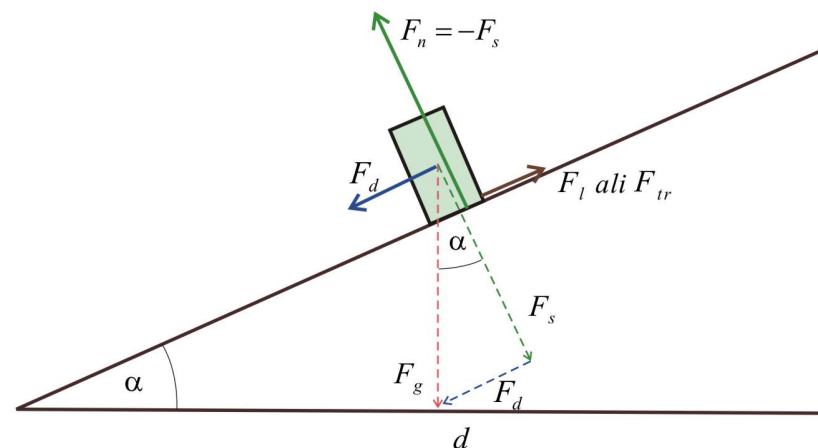
Ko je telo postavljeno na nagnjeno ravnino pod kotom θ , nanj deluje sila teže $\mathbf{F}_g$, ki jo lahko razstavimo na dve komponenti:

1. Pravokotna komponenta sile ($\mathbf{F}_N$):

- Deluje pravokotno na površino klanca.
- Njena velikost je odvisna od kota naklona:
$$F_N = mg \cos \theta$$
- Ta komponenta prispeva k normalni sili ($\mathbf{F}_N$), ki vpliva na velikost trenja med telesom in podlago.

2. Vzporedna komponenta sile ($\mathbf{F}_{\parallel}$):

- Deluje vzporedno s površino klanca in povzroča premik telesa navzdol.
- Izračunamo jo z enačbo:
$$F_{\parallel} = mg \sin \theta$$
- Večji kot naklona pomeni večjo vzporedno komponento in večjo verjetnost zdrsa.



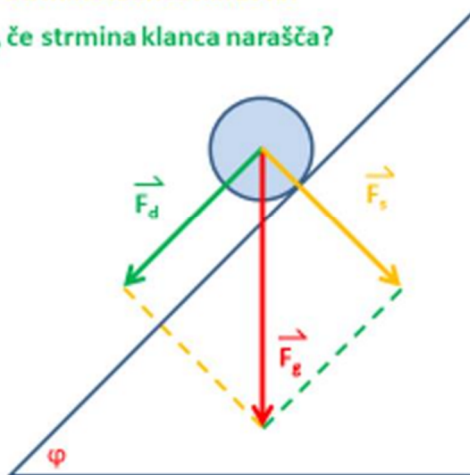
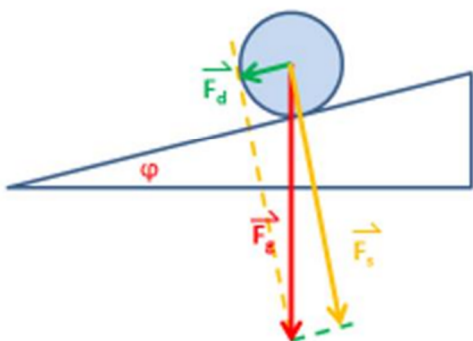
Vpliv naklona na stabilnost

- Ko je kot θ majhen, je vzporedna komponenta majhna, trenje pa lahko prepreči premik.
- Pri povečanju naklona θ se vzporedna komponenta poveča, medtem ko se pravokotna komponenta zmanjša, kar zmanjša trenje.
- Če vzporedna komponenta preseže največjo silo trenja, pride do zdrsa oziroma plazu.
- Kritični kot (θ) je kot, pri katerem se trenje izenači s silo, ki vleče telo navzdol – pri tem kotu pride do začetka zdrsa.

Velikost **statične** in **dinamične** komponente teže je odvisna **od kota klanca**.

Kako se spreminja statična komponenta teže, če strmina klanca narašča?

Kako se spreminja dinamična komponenta teže, če strmina klanca narašča?



2.3 Vloga trenja in adhezije pri stabilnosti pobočja

Stabilnost telesa na klanecu je močno odvisna od trenja med podlago in telesom. Obstajata dve vrsti trenja:

1. Statično trenje (F_s):

- Preprečuje začetek gibanja.
- Njegova največja vrednost je določena s koeficientom statičnega trenja (μ_s):

$$F_s \leq \mu_s F_N = \mu_s mg \cos \theta$$

- Če $F_{\parallel} > F_s$, se telo začne premikati.

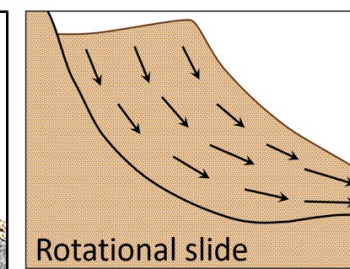
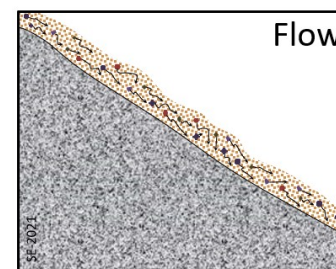
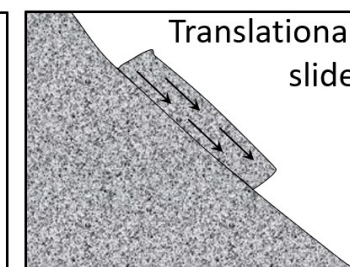
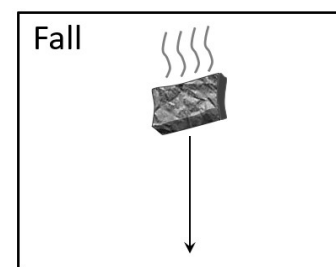
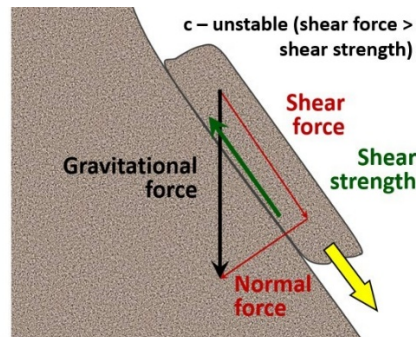
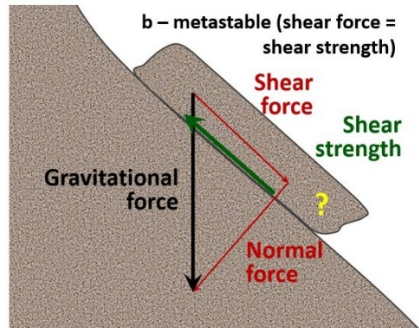
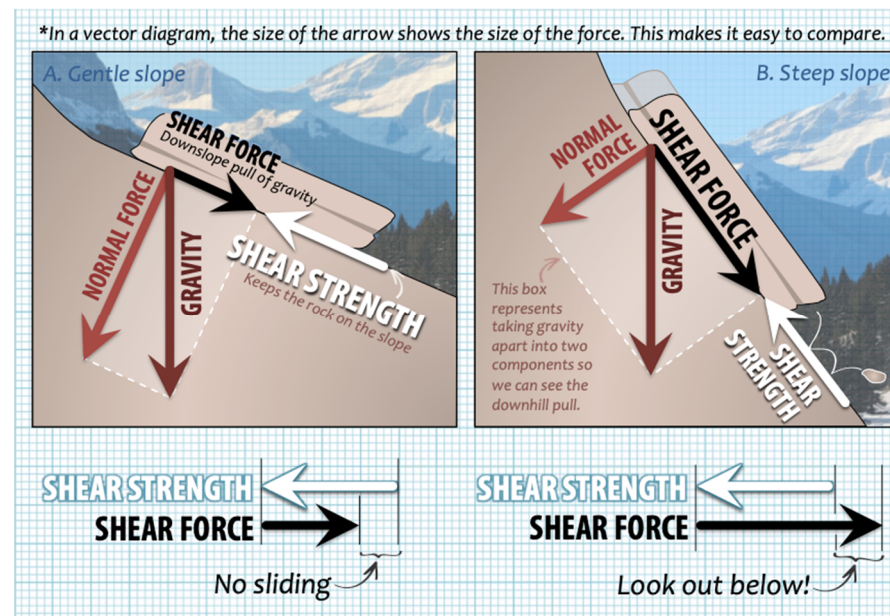
2. Kinetično trenje (F_k):

- Deluje, ko se telo že giblje.
- Njegova vrednost je določena s koeficientom kinetičnega trenja (μ_k):

$$F_k = \mu_k mg \cos \theta$$

- Pri pobočnih premikih, kot so plazovi, kinetično trenje določa hitrost in obseg gibanja materiala.

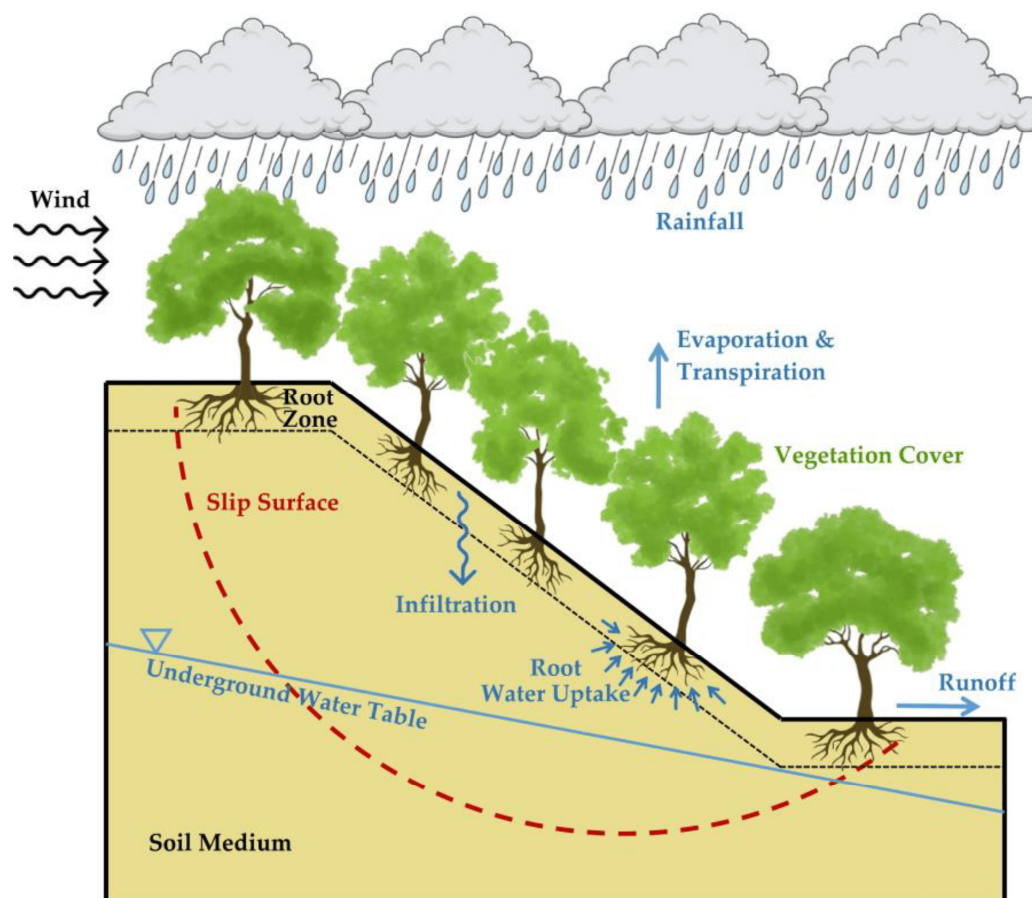
Adhezija (oprijem med delci) dodatno vpliva na stabilnost pobočij, saj preprečuje premik posameznih delcev. Vlažna tla imajo večjo adhezijo, medtem ko voda lahko zmanjša trenje in povzroči zdrs.



Dodatni vplivi na stabilnost pobočja

Poleg osnovnih fizikalnih sil na klancu na stabilnost vplivajo še drugi dejavniki:

- **Voda:**
 - Povečana nasičenost tal zmanjša trenje in poveča težo materiala.
 - Hidrostatični tlak lahko deluje kot dvigalna sila, kar zmanjša stabilnost.
- **Vegetacija:**
 - Koreninski sistemi rastlin prispevajo k stabilnosti, saj delujejo kot naravne vezi med delci zemlje.
 - Krčenje gozdov vodi v večjo verjetnost plazov.
- **Seizmična aktivnost:**
 - Potresi lahko sprožijo plazove z nenadnim zmanjšanjem trenja in premikom tal.
- **Antropogeni vplivi:**
 - Gradbeni posegi, odstranjevanje vegetacije in prekomerna obremenitev pobočij z infrastrukturnimi projekti povečajo tveganje za plazove.



Mehanizem nastanka plazov

Plazovi so naravni procesi, pri katerih se material premika po pobočju zaradi vpliva gravitacije. Različni tipi plazov nastanejo zaradi različnih sprožilnih dejavnikov, kot so naklon terena, geološka sestava, padavine, seizmična aktivnost in antropogeni vplivi. Razumevanje fizikalnega mehanizma plazov omogoča boljše načrtovanje preventivnih ukrepov in zmanjšanje tveganja za škodo v ogroženih območjih.

10 terrifying landslides: <https://www.youtube.com/watch?v=eJRL3uBQ4CA>

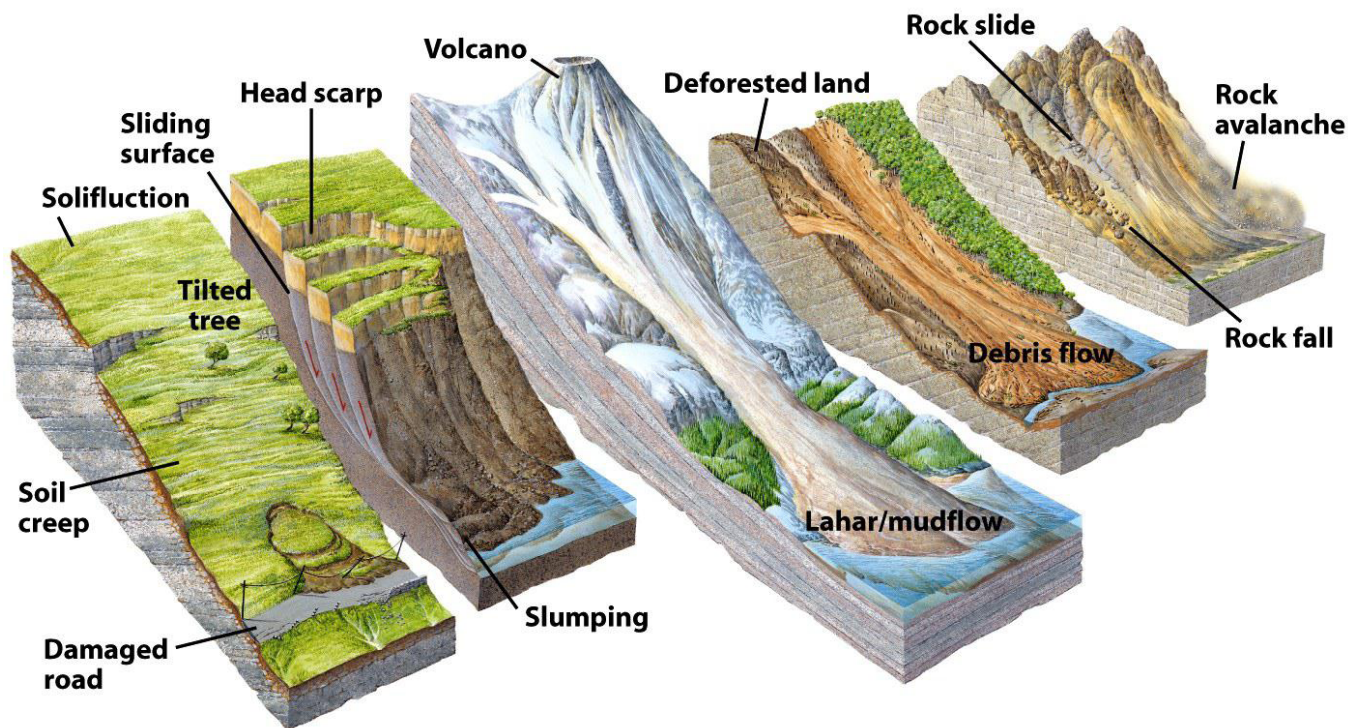
Documentary: <https://www.youtube.com/watch?v=5h-MBrHPWJs>

Kaj je plaz?

Plaz je premik zemljine, kamnin, snega ali vulkanskega materiala po pobočju, ki nastane, ko sile, ki povzročajo premik (gravitacija), presežejo sile, ki ohranjajo stabilnost (trenje, kohezija in odpornost materiala). Plazovi se lahko razlikujejo po hitrosti, velikosti in materialu, ki se premika.

Obstajajo različni načini razvrstitve plazov, pri čemer so osnovni kriteriji:

- Vrsta materiala (zemlja, sneg, kamnine, drobir, lava).
- Mehanizem premika (drsenje, tekoči tok, padec).
- Hitrost premika (od nekaj centimetrov na leto do več sto kilometrov na uro).



Dejavniki, ki vplivajo na nastanek plazov

Stabilnost pobočij je odvisna od razmerja med gravitacijsko silo, ki vleče material navzdol, in upornimi silami, ki preprečujejo zdrs. Na to razmerje vpliva več dejavnikov:

1. Naklon terena in nagib pobočja

- Večji kot naklona pomeni večjo vzporedno komponento gravitacije, kar povečuje verjetnost zdrs.
- Pri kritičnem kotu (običajno med 30° in 45° za zemeljske plazove, več pri snežnih plazovih) trenje ne more več preprečiti premika.

2. Geološka sestava in zgradba tal

- Plasti sedimentov ali preperelih kamnin so bolj nagnjene k zdrsom kot kompaktne magmatske kamnine.
- Prisotnost glinenih plasti deluje kot drsna podlaga zaradi nizkega trenja.

3. Voda in padavine

- **Nasičenost tal z vodo** zmanjša trenje in poveča težo materiala, kar poveča možnost zdrs.
- **Hitre padavine** lahko sprožijo plazove zaradi hitrega namakanja površinskih plasti.

4. Seizmična aktivnost

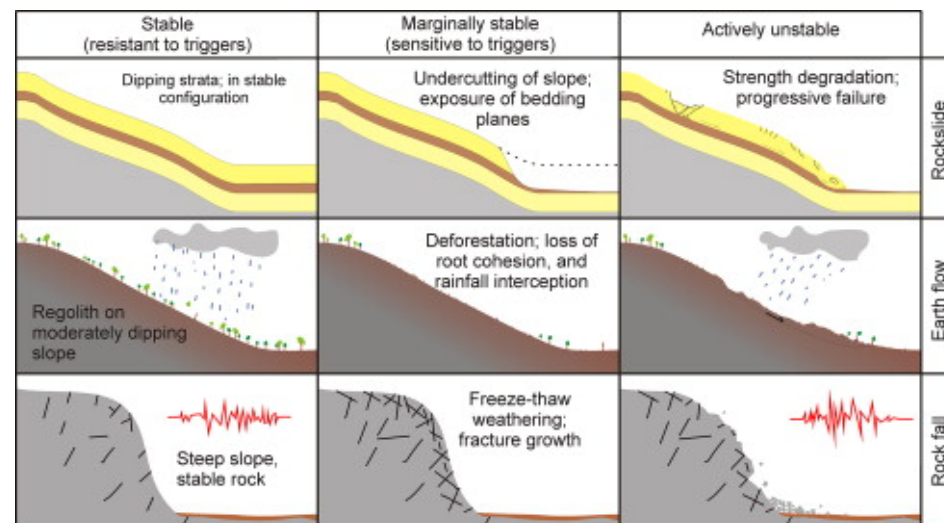
- Potresi povzročijo vibracije, ki zmanjšajo trenje in lahko nenadoma sprožijo plazove (npr. v Nepalu 2015).
- Likvefakcija lahko povzroči nenadno izgubo trdnosti zasičenih sedimentov.

5. Vegetacija in koreninski sistem

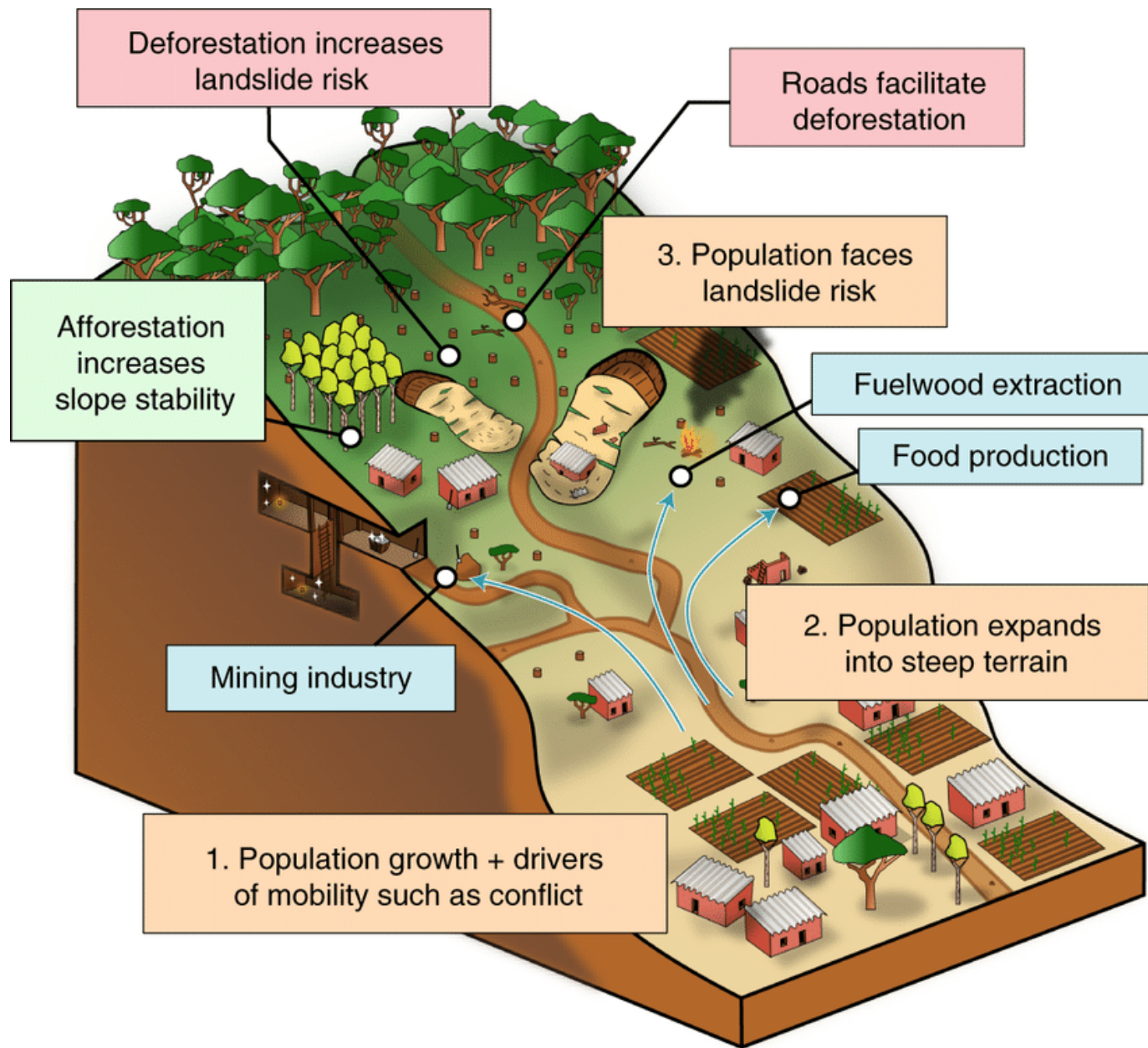
- Rastline stabilizirajo teren z vezanjem tal in zmanjševanjem erozije.
- Krčenje gozdov poveča erozijo in zmanjša stabilnost pobočja.

6. Antropogeni vplivi (človeški posegi)

- Izkopi in gradnja cest lahko destabilizirajo naravno ravnovesje pobočja.
- Odstranjevanje vegetacije poveča dovzetnost za plazove.



KMETIJSKA FIZIKA



Proces proženja plazju

Za nastanek plazju so potrebni trije ključni koraki:

What causes a landslide?: <https://www.youtube.com/watch?v=RCxvbosa4fU>

When nature strikes: Landslides: <https://www.youtube.com/watch?v=jDqXgopte-0>

1. Kopičenje napetosti v pobočju

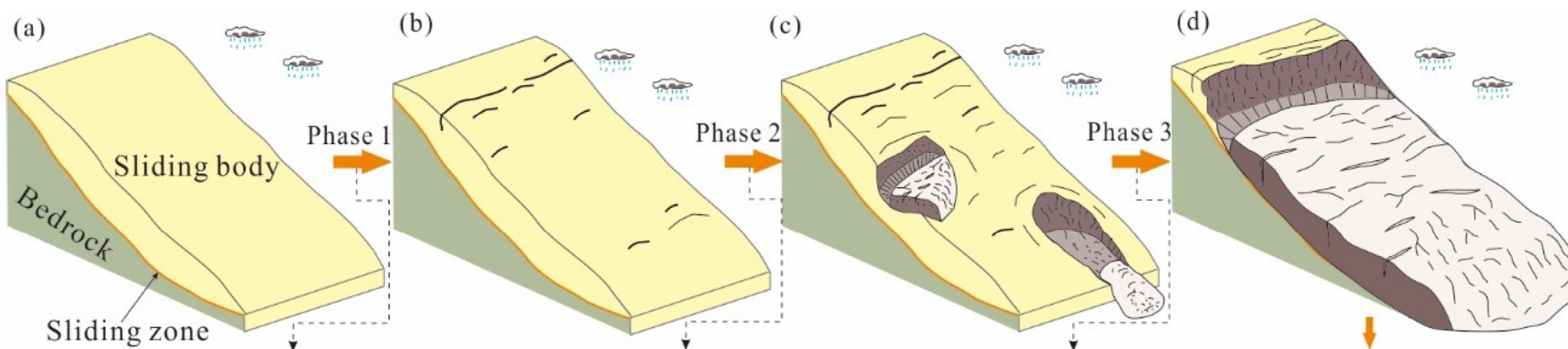
- Pobočne sile postopoma slabijo stabilnost zaradi erozije, padavin ali seizmične aktivnosti.
- Povečanje mase materiala zaradi namakanja ali nanosa sedimentov povečuje obremenitev.

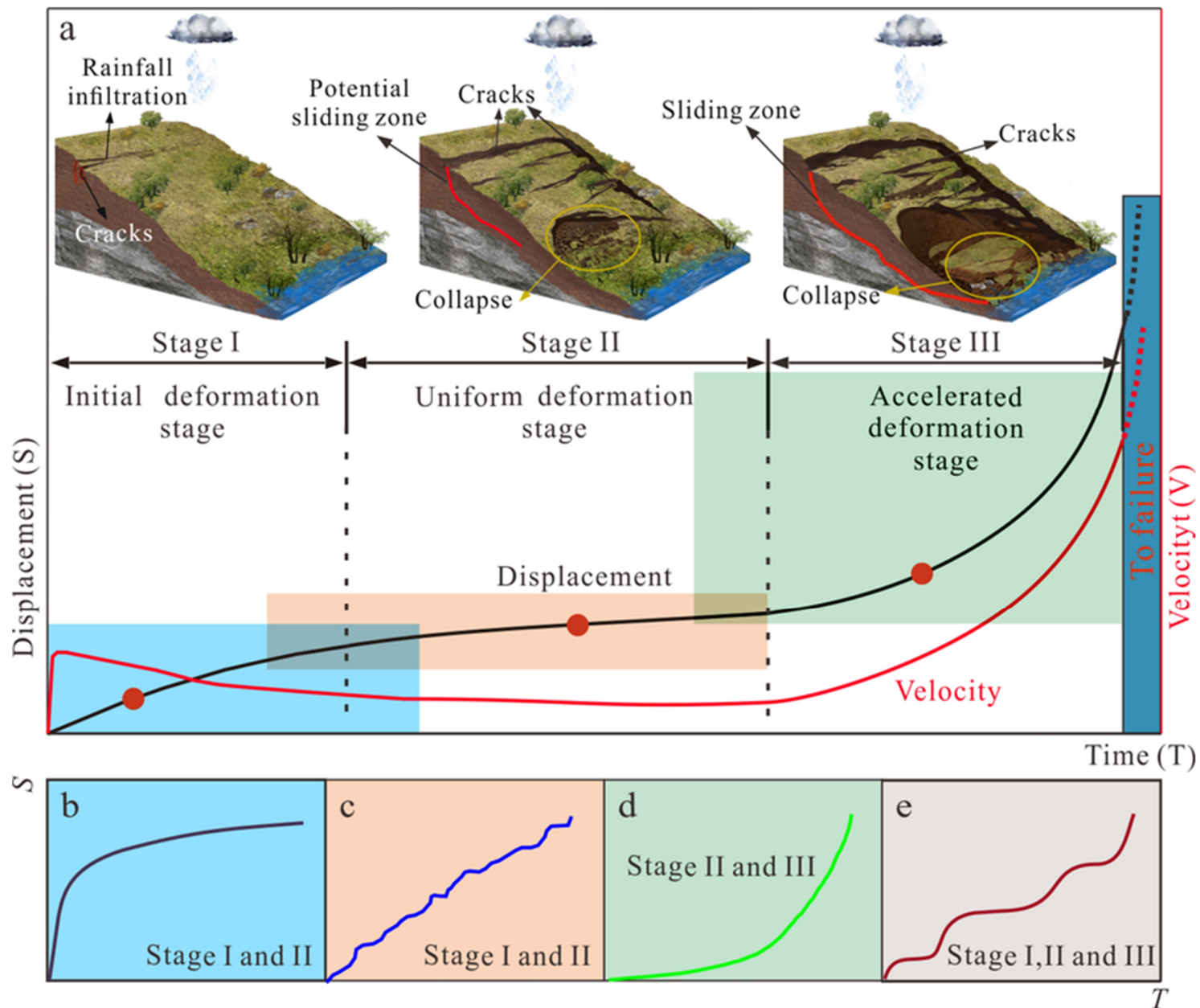
2. Kritični trenutek proženja

- Ko se vzporedna komponenta gravitacijske sile izenači ali preseže uporne sile (trenje in kohezija), se material začne premikati.
- Hitrost proženja je odvisna od vrste plazju (snežni plazovi so lahko skoraj takojšnji, zemeljski plazovi pa lahko trajajo dlje časa).

3. Faza premika in ustavljanja

- Material se premika po pobočju, dokler ne izgubi dovolj energije ali dokler ne naleti na oviro.
- Pri nekaterih plazvih (drobirski tokovi, piroklastični tokovi) lahko material teče na velike razdalje.





Vrste plazov glede na mehanizem premika

Plazovi se delijo glede na način premikanja materiala:

1. Drsni plazovi (zemeljski in skalni plazovi)

- Material se premika kot enotna masa po drsni ravnini.
- Lahko so **rotacijski** (krivuljasta drsna ravnina) ali **translacijski** (premik po ravni ploskvi).

2. Tekoči tokovi (drobirski tokovi, blatni tokovi)

- Vsebujejo velike količine vode, kar omogoča hitro premikanje materiala.
- Lahko dosežejo visoke hitrosti in preplavijo doline.

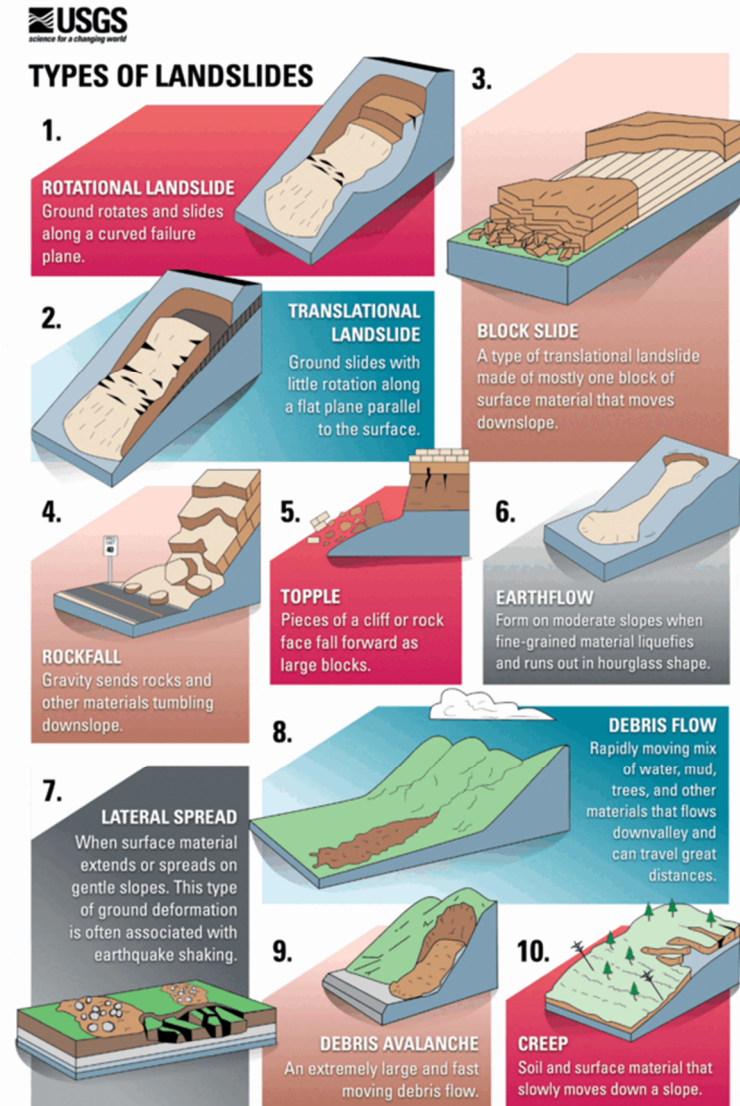
3. Piroklastični tokovi (vulkanski plazovi)

- Vulkanski plini, vroč pepel in kamnine se premikajo z veliko hitrostjo.
- Smrtonosni zaradi visoke temperature in hitrosti (primer: izbruh Vezuva, 79 n. št.).

4. Snežni plazovi

- Sprožijo se, ko se zgornja plast snega loči od spodnje plasti zaradi šibke vezave ali zunanjih obremenitev.
- Razlikujemo **sipke plazove** (hitri, suhi sneg) in **kložaste plazove** (strnjene plasti snega, ki se zlomijo kot deska).

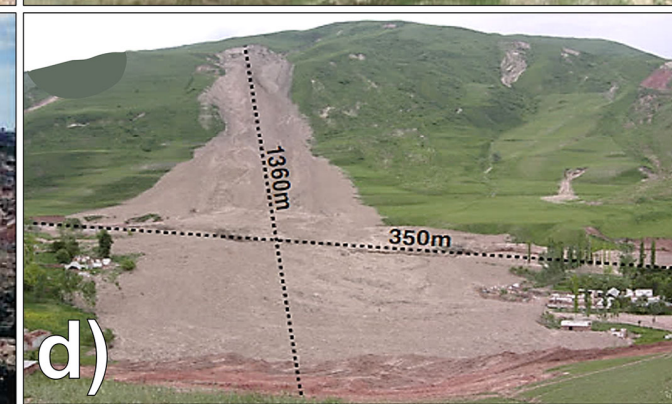
<https://www.youtube.com/watch?v=SvDOo595vew>



By: Steven Sobieszczuk (modified Highland and Johnson, 2004)

Vrste pobočnih procesov in njihova povezava s silami na klancu

Pobočni procesi vključujejo različne oblike premikov materiala po nagnjenih terenih in so neposredno povezani s silami na klancu. Gravitacija je glavni dejavnik teh premikov, pri čemer na stabilnost pobočja vplivajo tudi trenje, adhezija, voda in drugi zunanji dejavniki. Glede na mehanizem premika in vrsto materiala ločimo več vrst pobočnih procesov: **zemeljske plazove, snežne plazove, drobirske tokove in piroklastične tokove.**



Zemeljski plazovi (klasični gravitacijski premiki zemljine)

Mehanizem premika

- Zemeljski plazovi nastanejo, ko gravitacijska sila preseže trenje in kohezijo zemljine, kar povzroči premik materiala po drsni ploskvi.
- Lahko se zgodijo nenadoma ali postopoma skozi daljše obdobje.

Vrste zemeljskih plazov

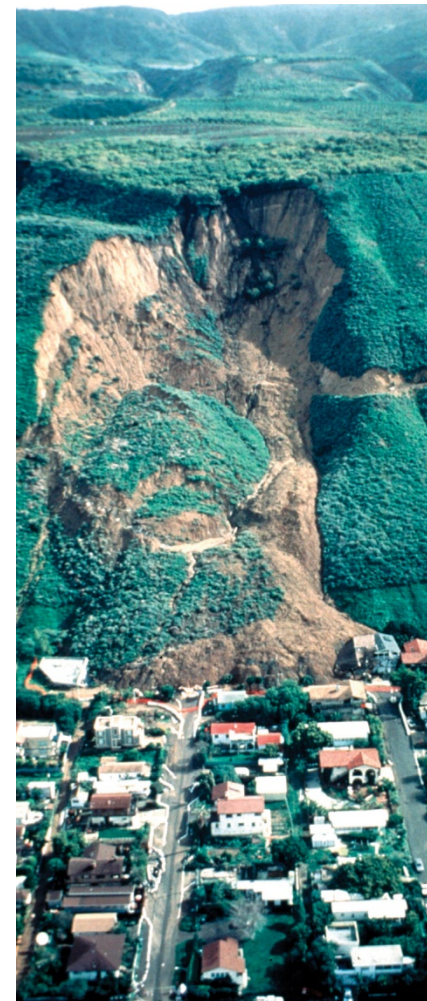
1. **Rotacijski plazovi** – premik se zgodi po ukrivljeni drsni površini.
2. **Translacijski plazovi** – material zdrsne po ravni ploskvi.
3. **Počasni pobočni premiki (creep)** – zelo počasno premikanje zemlje, pogosto neopaženo.

Vpliv pobočnih sil

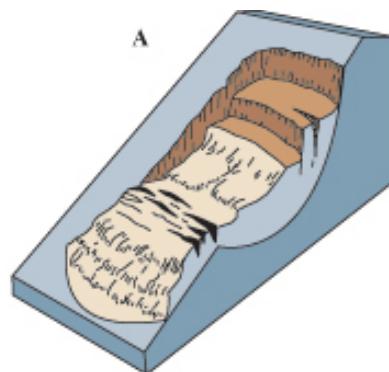
- **Sila teže** deluje navzdol, pri čemer vzporedna komponenta vleče material proti dnu pobočja.
- **Trenje in kohezija** zagotavljata upornost – ko sta premajhna, pride do zdrsa.
- **Voda** lahko deluje kot mazivo in zmanjša trenje, kar vodi do nestabilnosti.

Primeri

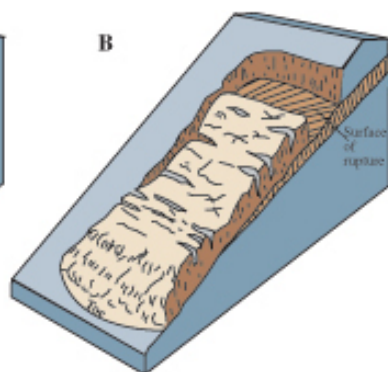
- Plaz Stože (Slovenija, 2000) – translacijski plaz, ki je sprožil uničujoč drobirski tok.
- Plaz Oso (ZDA, 2014) – katastrofalen zdrs sedimentov zaradi dolgotrajnega namakanja pobočja.



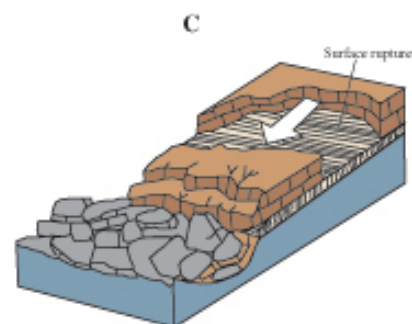
KMETIJSKA FIZIKA



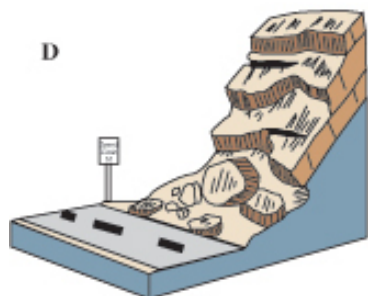
Rotational landslide



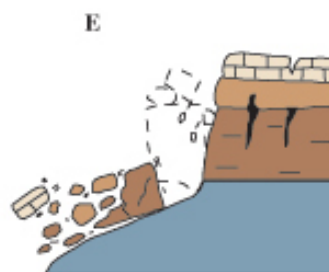
Translational landslide



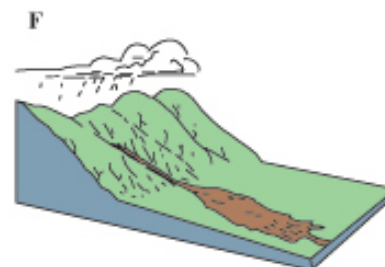
Block slide



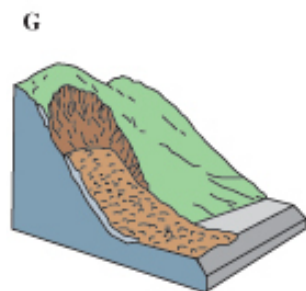
Rockfall



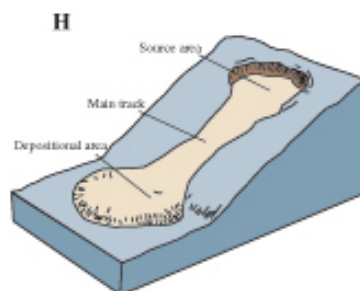
Topple



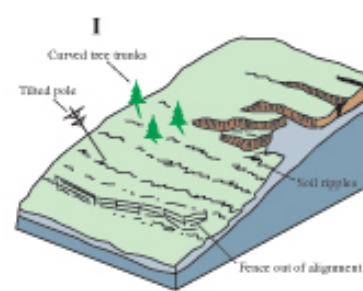
Debris flow



Debris avalanche



Earthflow



Creep



Plaz Stože – zgornji del (2000) https://www.youtube.com/watch?v=A_blpoac0uE&t=1263s



Plaz Stože – spodnji del (2000)



Plaz Stože – pogled z zraka (2000)

Snežni plazovi

Veritasium: <https://www.youtube.com/watch?v=Zce-V0YVzel&t=40s>

Mehanizem premika

- Snežni plazovi nastanejo, ko se zgornja plast snega loči od podlage in se premakne po nagnjeni površini zaradi gravitacije.
- Ključni dejavniki so strmina, vrsta snega, temperatura in obremenitev.

Vrste snežnih plazov

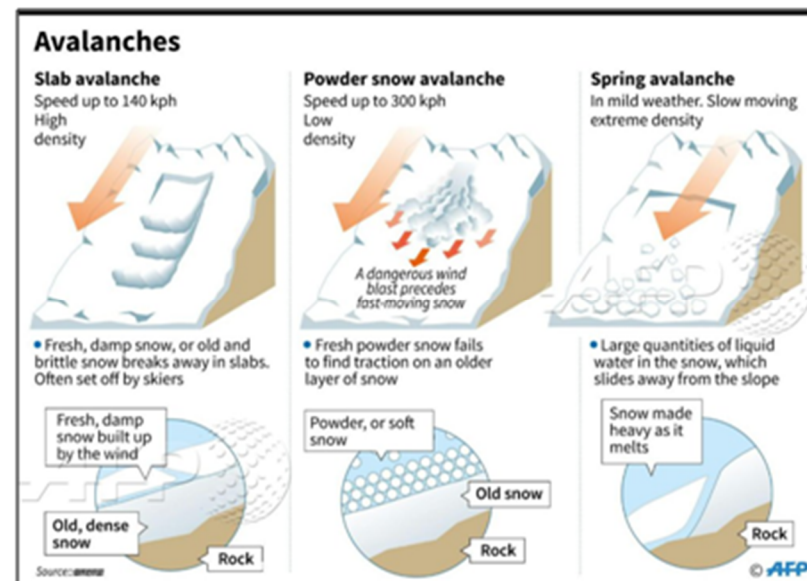
1. **Kložasti plazovi** – plast zbitega snega se zlomi in drsi kot enota.
2. **Sipki snežni plazovi** – suhi sneg se sproži in širi kot pahljača.
3. **Mokri snežni plazovi** – težki plazovi, ki vsebujejo veliko vode in se gibljejo počasneje.

Vpliv pobočnih sil

- **Sila teže** vleče sneg navzdol, pri čemer večji naklon pomeni večjo nevarnost.
- **Trenje** med snežnimi plastmi deluje kot stabilizator – šibke plasti zmanjšajo trenje in omogočijo zdrs.
- **Zunanje obremenitve** (smučarji, veter, potresi) lahko sprožijo plaz.

Primeri

- Snežni plaz v avstrijskih Alpah (1999) – eden največjih snežnih plazov, ki je zasul več vasi.
- Plaz v Himalaji (2015) – sprožen zaradi potresa magnitude 7,8.

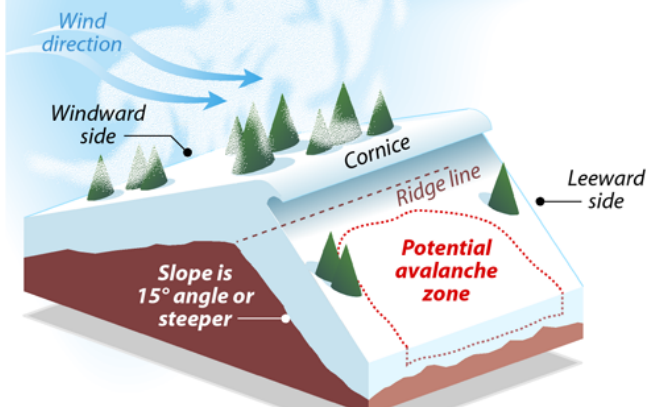


Avalanche Anatomy

Avalanches are caused by certain combinations of wind, temperatures, snow and terrain, and global warming could increase the danger in some regions or during some seasons.

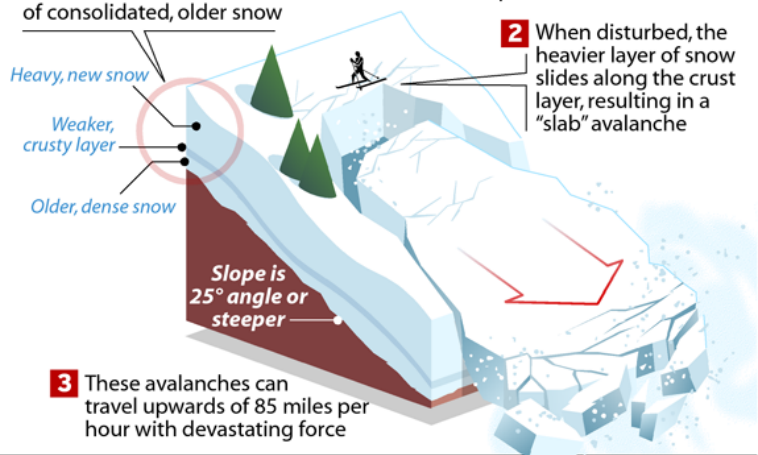
AVALANCHE IN THE MAKING

Avalanches more frequently occur on the leeward side of a ridgeline, on slopes that are at a 15° incline or steeper.



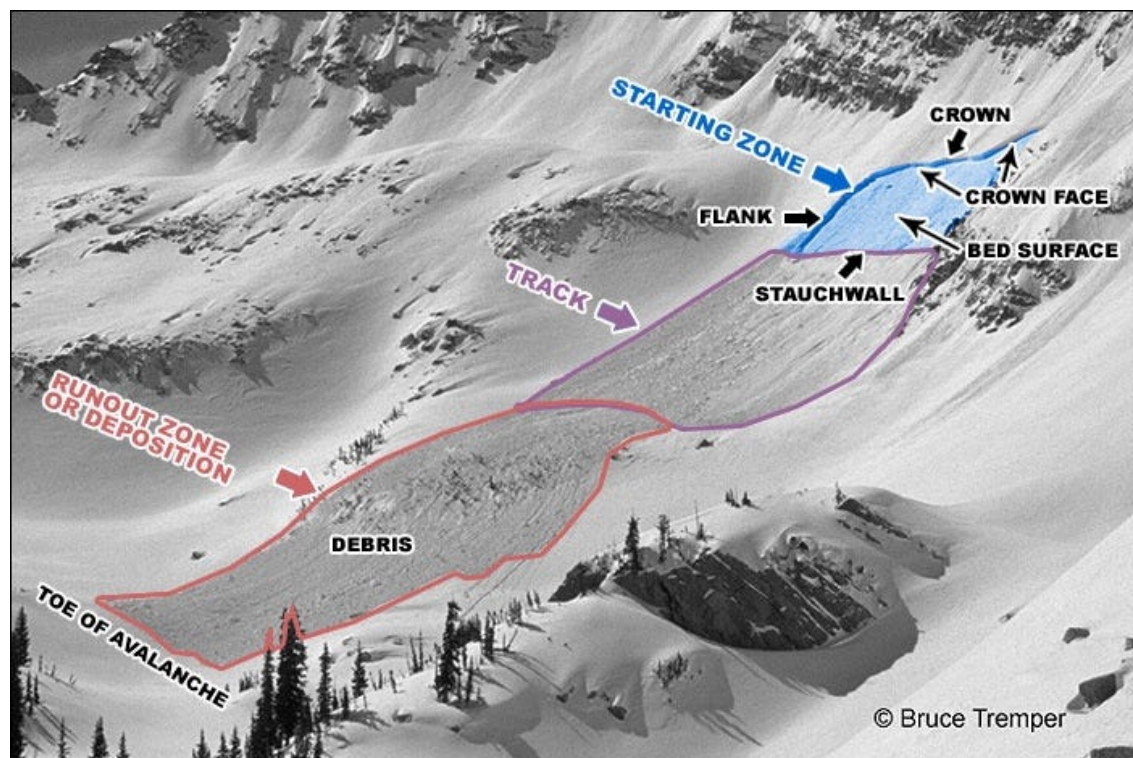
“SLAB” AVALANCHE AT A GLANCE

- 1** Avalanche conditions commonly occur when heavy, new snowfall accumulates on a weaker crust on top of consolidated, older snow
- 2** When disturbed, the heavier layer of snow slides along the crust layer, resulting in a “slab” avalanche
- 3** These avalanches can travel upwards of 85 miles per hour with devastating force



SOURCES: ICN research

PAUL HORN / Inside Climate News



© Bruce Tremper

Canadian Classification System

Canadian Classification System for avalanche size

Rating	Scale	Damage
1	Very small	Relatively harmless to people
2	Small	Could bury, injure or kill a person
3	Medium	Could break a few trees, destroy a car, bury a small building
4	Large	Could destroy a railway car, large building or substantial amount of forest.
5	Max	Could destroy a village or forest up to 40 ha

SOURCE: McClung & Schaerer, 1981

© Global News



Plaz v Avstriji, 1999 (Galtür)

Piroklastični tokovi

<https://www.youtube.com/watch?v=hvuP7kuX7Dk>

<https://www.youtube.com/watch?v=f-doAnx4dXE>

White island documentary: <https://www.youtube.com/watch?v=5nGnXthjVgc>

<https://www.youtube.com/watch?v=WxnSCzYndaw>

Mehanizem premika

- Piroklastični tokovi nastanejo med vulkanskimi izbruhi, ko se vroči plini, pepel in kamnine sprostijo iz vulkana in se premikajo z veliko hitrostjo.
- So izjemno vroči (do 1000°C) in lahko potujejo s hitrostjo več sto km/h.

Vpliv pobočnih sil

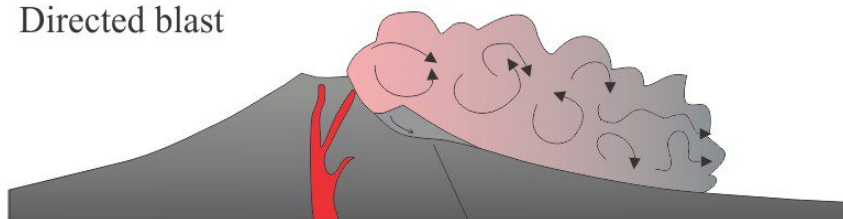
- **Sila teže** vleče gost material navzdol, pri čemer oblaki vročih plinov zmanjšajo trenje in omogočajo hitro gibanje.
- **Eksplzivnost vulkana** določa količino sproščenega materiala in hitrost toka.

Primeri

- Izbruh Vezuva (79 n. št.) – piroklastični tokovi so uničili Pompeje.
- Izbruh Mount St. Helens (1980) – vroč plin in pepel sta z veliko hitrostjo pometla s pokrajino.

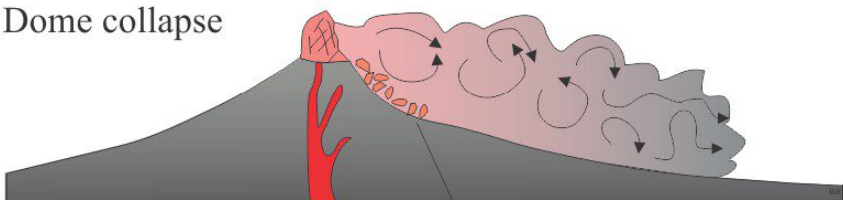


Directed blast



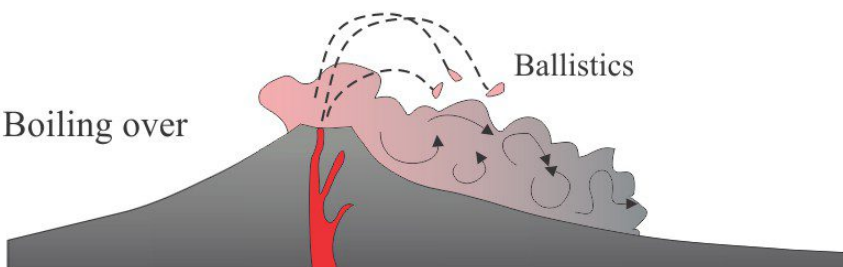
Flank collapse - landslides

Dome collapse

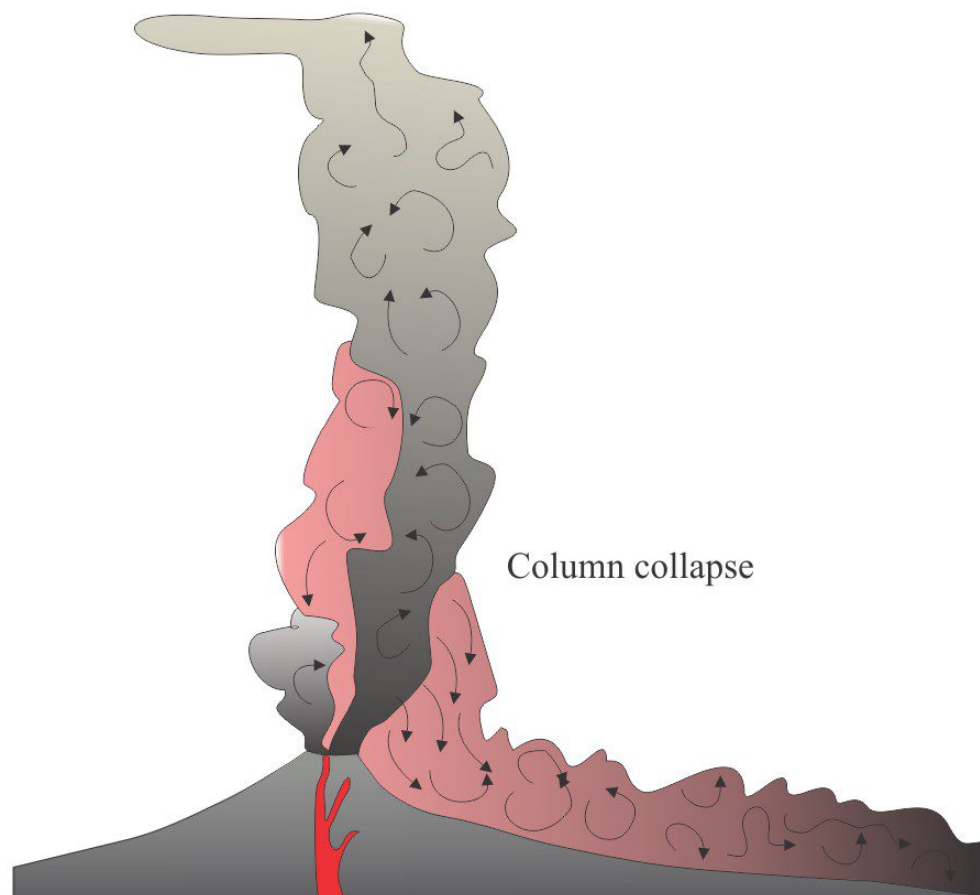


Block and ash flows

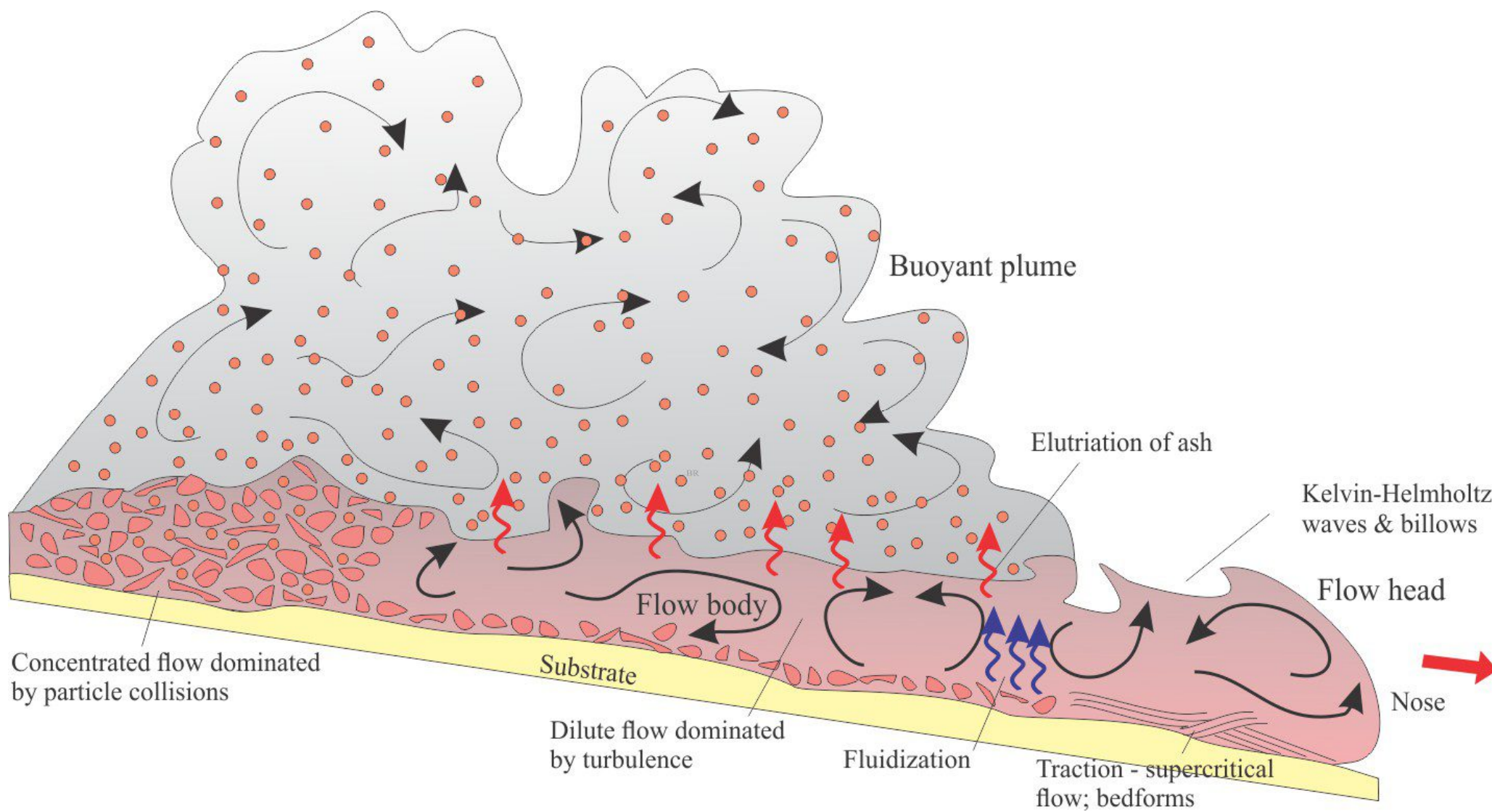
Boiling over



Ballistics



Column collapse





Pinatubo, Philippines



Colo volcano on August 19, 1983, Indonesia

4.5 Primerjava različnih pobočnih procesov

Vrsta plazu/toka	Material	Hitrost	Vpliv gravitacije	Glavni sprožilni dejavniki
Zemeljski plaz	Zemlja, kamenje	Počasno do srednje hitro	Razpad trenja in stabilnosti	Padavine, potresi, posegi
Snežni plaz	Sneg	Hitro	Presežek gravitacije nad trenjem	Naklon, veter, temperatura
Drobirski tok	Blato, voda, skale	Zelo hitro	Gravitacija omogoča tok	Padavine, vulkani, potresi
Piroklastični tok	Vroč plin, pepel, kamenje	Izjemno hitro	Gost material pada pod vplivom gravitacije	Vulkanizem, eksplozivni izbruhi

Turbiditni tokovi

<https://www.youtube.com/watch?v=8gYJJjxY8g0&t=61s> <https://www.youtube.com/watch?v=l935CKEKCaA>

Mehanizem premika

Turbiditni tokovi so podvodni pobočni procesi, pri katerih se zmes vode, sedimentov in drobirja premika po nagnjenih morskih ali jezerskih dneh. Ti tokovi so glavni mehanizem prenosa sedimentov v globokomorske bazene in igrajo ključno vlogo pri oblikovanju morskih sedimentnih plasti (turbiditnih zaporedij).

Turbiditni tokovi se sprožijo zaradi:

- Podvodnih plazov na strmih kontinentalnih pobočjih.
- Seizmične aktivnosti (potresi povzročijo nenaden zdrs sedimentov).
- Hitrega nalaganja sedimentov na strme podvodne pobočja.
- Neviht ali cunamijev, ki destabilizirajo podvodne sedimente.

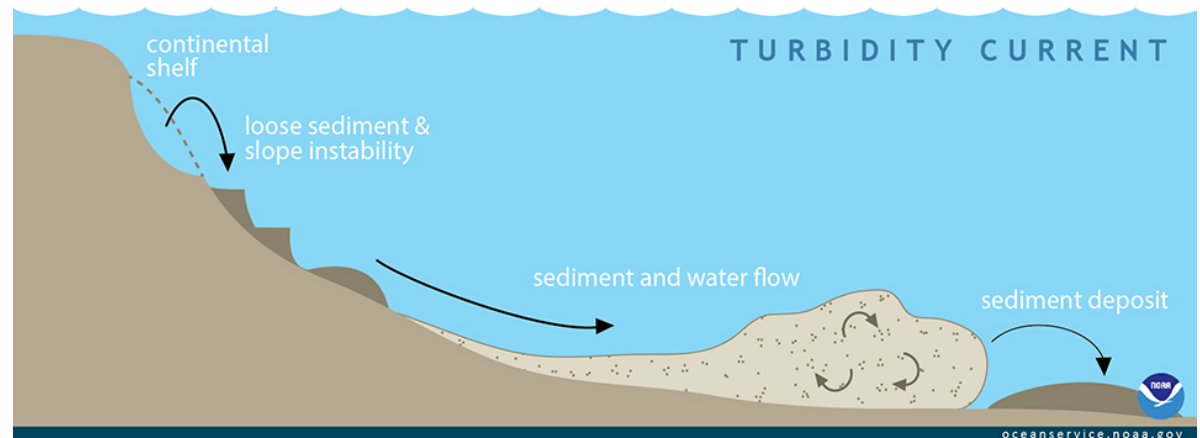
Vpliv pobočnih sil

- **Sila teže** vleče gostejši sedimentni tok po nagnjenem podvodnem terenu.
- **Gostotna razlika** med sedimentno obogateno vodo in okolno čisto vodo omogoča dolgotrajno gibanje toka.
- **Trenje** s podlago postopoma upočasni tok in povzroči usedanje sedimentov.

Struktura turbiditnega toka

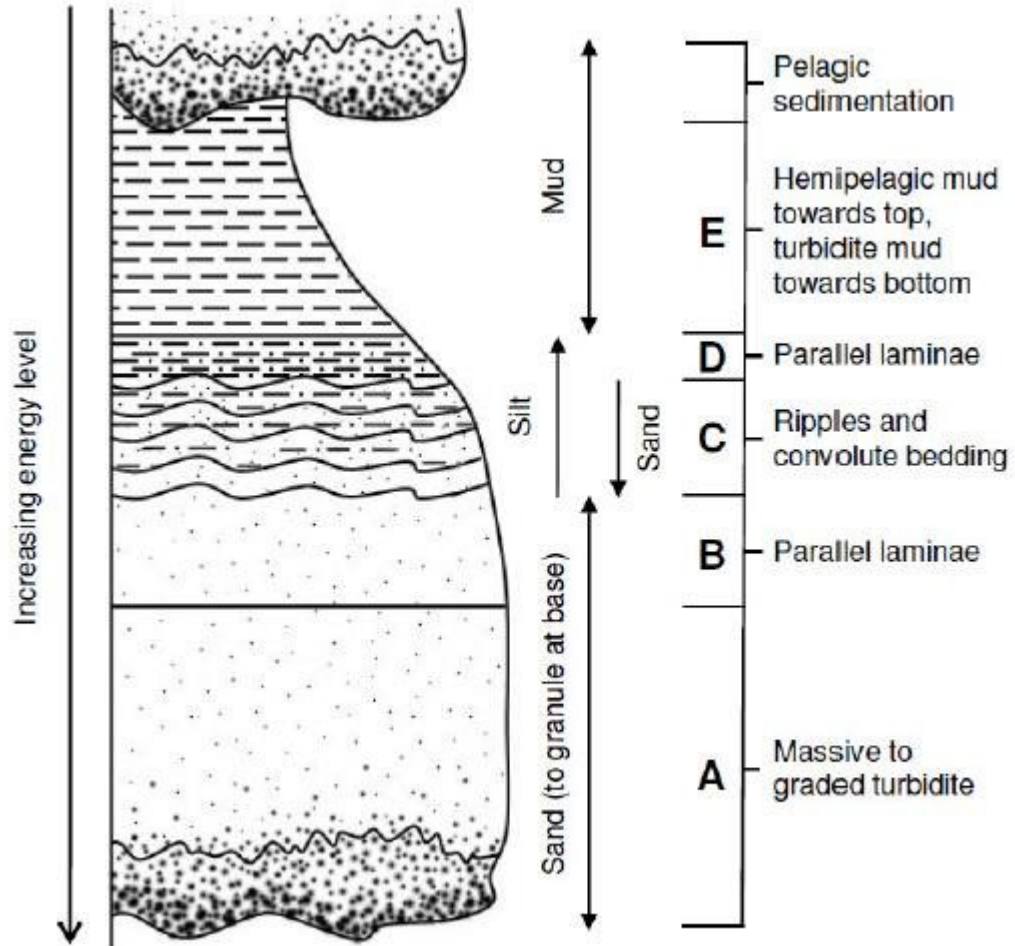
Turbiditni tokovi imajo značilno slojevito strukturo, kjer se zaradi postopnega zmanjševanja hitrosti večji delci odlagajo najprej, manjši pa kasneje. To ustvari turbiditne plasti s tipično **Bouma zaporedje**, ki vsebuje:

1. Grobe konglomerate in peske (spodnji del).
2. Fini pesek in melje (srednji del).
3. Glinaste plasti (zgornji del).



Bouma sekvence v flišu

<https://www.youtube.com/watch?v=BUVSf1UTxqA>





Fliš pri Debelem rtiču

Preventiva In Zaščita Pred Plazovi

	Vrsta plazu/toka	Preventivni ukrepi	Zaščitni ukrepi
1	Zemeljski plaz	Oporni zidovi, drenažni sistemi, terasiranje pobočij	Mreže proti zdrsom, pilotiranje, zasaditev vegetacije
2	Snežni plaz	Protiplazovne ograje, kontrolirano sproščanje snega, zgodnje opozarjanje	Protiplazovni stebri, utrditev snežne odeje, preprečevanje obremenitve pobočij
3	Drobirski tok	Zadrževalni bazeni, kanaliziranje tokov, odvodnjavanje	Gradnja zaščitnih kanalov, monitoring padavin, alarmni sistemi
4	Piroklastični tok	Evakuacijski načrti, spremljanje vulkanske aktivnosti, zaščitne bariere	Izdelava zaščitnih pregrad, omejevanje gradnje na ogroženih območjih
5	Turbiditni tok	Podvodno kartiranje, opozorilni sistemi za cunamije	Monitoring sedimentacije, zgodnje opozorilne naprave na dnu oceanov

Plazovi predstavljajo resno naravno nevarnost, ki lahko povzroči veliko škodo na infrastrukturi, ogrozi življenja in spremeni pokrajino. Zato je ključnega pomena, da se izvajajo preventivni ukrepi za zmanjšanje tveganja in zaščito pred plazovi. Ukrepi so lahko **geotehnični (gradbeni)**, **naravni (ekološki)** in **sistemski (monitoring in zgodnje opozarjanje)**.

<https://www.youtube.com/watch?v=zl6EwTrJxCc>

<https://www.youtube.com/watch?v=cqtwULzkwls>

